

# Metaličnost zvezda sa ekstrasolarnim planetama

---

*Ispitana je metoda za određivanje metaličnosti zvezda pomoću empirijskih grafika krive rasta za zvezde sa i bez planeta. Na osnovu izračunate metaličnosti ispitana je distribucija metaličnosti tih zvezda. Linija na osnovu koje je računata metaličnost zvezda je linija neutralnog gvožđa na 5379.57Å. Empirijski grafik krive rasta se pokazao kao dobar metod za određivanje metaličnosti. Kod nekih spektralnih klasa primećene su razlike u metaličnosti izračunatih pomoću empirijskih grafika krive rasta u odnosu na teorijske. Mogući uzrok toga je mali broj zvezda pomoću kojih su nacrtani empirijski grafici. Korišćenjem K-S testa izračunato je da verovatnoća da zvezde sa planetama dolaze iz iste populacije kao zvezde bez planeta iznosi 0.62. Dibižna razlika metaličnosti zvezda sa planetama i zvezda bez planeta iznosi 0.14 dex.*

---

## Uvod

Prve zvezde sadržale su vodonik i u manjoj količini helijum. Fuzijom ovih elemenata je došlo do formiranja težih, kao što su litijum, berilijum i težih, sve do gvožđa. U eksplozijama supernovih formira se oblak prašine i gasa koji osim vodonika i helijuma sadrži i teže elemente. Iz tog oblaka prašine i gasa nastaju nove zvezde koje će fuzijom proizvesti još teže elemente, i taj se proces ponavlja. U astronomiji se pod metalima podrazumevaju svi elementi teži od vodonika i helijuma. Gvožđe je jedan od elemenata koji se najčešće koristi za određivanje metaličnosti, zato što najviše linija emituje u vidljivom delu spektra i na osnovu njih lako se može izračunati metaličnost zvezda.

Metaličnost zvezde je logaritamska razlika odnosa koncentracije metala i koncentracije vodonika koji se nalazi u atmosferi zvezde i odnosa koncentracije metala i koncentracije vodonika u Suncu. Kao jedinica metaličnosti koristi se dex, što je skraćeno od eng. decimal exponent (metaličnost zvezde od npr.  $-0.15$  dex je u stvari metaličnost od  $10^{-0.15}$ ). Sastav atmosfere se kod najvećeg broja zvezda ne menja od njenog nastanka. Na osnovu analize metaličnosti moguće je proceniti kada je zvezda nastala.

---

*Dušan Vukadinović  
(1994), Niš, Ljička 9,  
učenik 2. razreda  
Gimnazije „Svetozar  
Marković“ u Nišu*

*MENTOR: Ivan Milić,  
Astronomska  
opservatorija Beograd*

Zvezde se po metaličnosti i starosti mogu podeliti u dve populacije. Zvezde populacije II imaju malu metaličnost. Karakteriše ih velika disperzija brzina (Lequeux 2003). Zvezde iz ove grupe se najčešće nalaze u halou galaksije, a mogu se naći i na obodu diska. Zvezde koje su masivne i mlade, koje se nalaze u disku galaksije i koje su metalichnije spadaju u populaciju I (Lequeux 2003).

Na strukturu i evoluciju zvezde najviše utiču njena masa i hemijski sastav. Životni vek zvezde određen je njenom masom, jer je kod masivnijih zvezda proces fuzije brži. Pokazano je da je metalichnost zvezde usko povezana sa postojanjem planeta oko nje (Johnson *et al.* 2010).

U svom radu Rocha-Pinton i Maciel (1998) su pokazali da postoji distribucija metalichnosti kod zvezda klase F koja je slična distribuciji metalichnosti kod zvezda klase G. U radu Fischer-a i Valenti-ja (2005) pokazano je da se distribucije metalichnosti zvezda sa planetama i zvezda bez planeta međusobno razlikuju. Zvezde sa planetama imaju veću metalichnost za oko 0.12 dex od zvezda bez planeta. Najveći procenat zvezda sa planetama ima metalichnost od 0 dex do +0.4 dex (Fisher i Valenti 2005).

Metaličnost zvezda moguće je odrediti na osnovu grafika krive rasta. To su grafici koji predstavljaju zavisnost logaritma površine (ekvivalentne širine) linije pomnožene sa talasnom dužinom linije od koncentracije elemenata u zvezdi pomnožene sa verovatnoćom prelaza u datoj liniji. Za svaku zvezdu i za svaku liniju u njoj postoji poseban grafik krive rasta, ali se on ne razlikuje mnogo od linije do linije, pa je dovoljan jedan grafik krive rasta za jednu zvezdu.

Empirijski grafik krive rasta predstavlja zavisnost logaritma ekvivalentne širine linije i metalichnosti zvezde. Pošto se metalichnost definiše kao odnos koncentracija Fe i H, gde je koncentracija H kod zvezda iste spektralne klase približno jednaka, moguće je direktno dovesti u vezu metalichnost i ekvivalentnu širinu linije.

Cilj ovog rada je da se ispita tačnost izračunavanja metalichnosti zvezda pomoću empirijskih grafika krive rasta i da se na osnovu izračunate metalichnosti zvezda utvrdi da li zvezde sa planetama dolaze iz iste populacije kao i zvezde bez planeta. Grafik krive rasta predstavlja teorijski grafik zavisnosti ekvivalentne širine linije od koncentracije apsorbera.

## Teorijske osnove

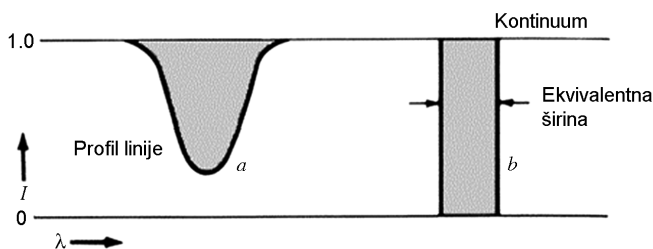
### Ekvivalentna širina

Apsorpcijom zračenja u zvezdanoj atmosferi dolazi do formiranja apsorpcionih linija u spektru zvezde. Apsorpciona linija nastaje kada atomi apsorbuju fotone čija je energija dovoljna da elektroni u tim atomima pređu na viši energetski nivo. Apsorpciona linija definisana je svojom du-

binom, odnosno intenzitetom i širinom. Na širenje linije najviše utiče temperatura zvezde. To širenje se zove termalno (Doplerovo) širenje. Nastaje usled termalnog kretanja gasa na nekoj temperaturi. Atomi se kreću haotično, što znači da će se jedni atomi kretati od posmatrača, dok će se drugi kretati ka posmatraču. Činjenica da se podjednak broj atoma kreće u oba smera rezultuje simetrično širenje linije (Prodanović 2010). Svaki atom apsorbuje određenu količinu energije na različitim talasnim dužinama, odnosno svaki atom ima svoj jedinstven spektar. Iz apsorpcionih linija moguće je odrediti sastav atmosfere zvezde. Što je više apsorbera time je i apsorpciona linija dublja i šira. Jačina apsorpcione linije određena je njenom ekvivalentnom širinom (eng. equivalent width,  $W$ ), koja predstavlja širinu pravougaonika jedinične visine (kontinuum je normiran na jedinicu) čija je površina jednaka površini date apsorpcione linije (slika 1):

$$W = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( 1 - \frac{F_{\lambda}}{F_c} \right) d\lambda, \quad (1)$$

gde je  $F_{\lambda}$  fluks na datoj talasnoj dužini  $\lambda$ , a  $F_c$  fluks kontinuuma spektra.

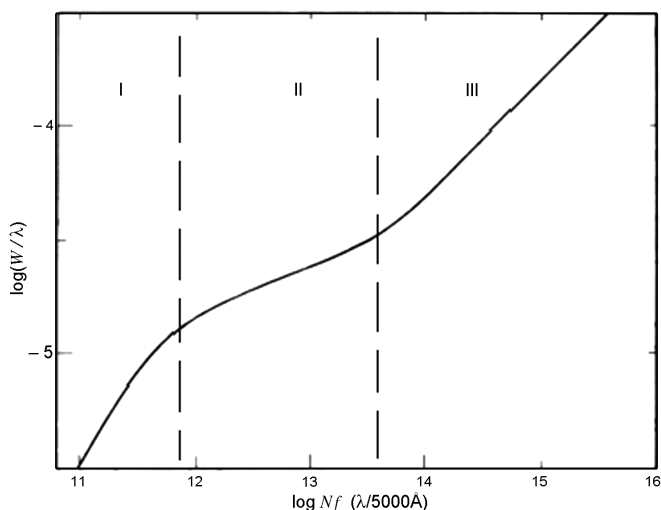


Slika 1. Ekvivalentna širina linije  $W$  (površina apsorpcione linije,  $a$  jednaka je površini pravougaonika,  $b$ , normiranog na kontinuum spektra).

Figure 1. Equivalent width of line is  $W$  (area of absorption line,  $a$  is equal to the area of the rectangle,  $b$ , standardised to the continuum of spectra)

## Kriva rasta

Na osnovu ekvivalentne širine i grafika krive rasta, moguće je proceniti koncentraciju atoma u atmosferi zvezde. Zavisnost koncentracije apsorbera od ekvivalentne širine linije je u prvom delu grafika linearna (na slici označeno brojem I). Ovom delu grafika pripadaju linije malog intenziteta, male optičke dubine, odnosno linije kojima ne odgovara velika koncentracija apsorbera. Linije koje pripadaju ovom delu grafika su najpogodnije za izračunavanje koncentracije apsorbera, jer kod njih nije došlo do termalnog širenja (Prodanović 2010). U drugom delu grafika (II), zavisnost između koncentracije i ekvivalentne širine linije je  $W \propto \sqrt{\ln N}$  i tu spadaju linije srednje jačine, dok je na trećem delu (III) grafika zavisnost koncentracije i ekvivalentne širine  $W \propto \sqrt{N}$  i tu dominiraju linije velike koncentracije i širine.



Slika 2. Grafik krive rasta Sunca ( $\lambda$  je talasna dužina linije,  $f$  je jačina oscilatora i ona opisuje jačinu datog prelaza u atomu, a  $N$  je koncentracija apsorbera)

Figure 2. Graph of curve of growth ( $\lambda$  is wavelength,  $f$  is oscillator strength and it describes strength of transition in an atom, and  $N$  is the concentration of an absorber)

## Metod

Rad je organizovan u dva dela. U prvom delu rada napravljeni su empirijski grafici krive rasta. U drugom delu su na osnovu ovako dobijenih grafika izračunate metaličnosti analiziranih zvezda. Metaličnosti zvezda koje su korišćene za crtanje empirijskih grafika krive rasta nisu korišćene i za analizu.

Spektri zvezda za analizu preuzeti su iz ELODIE arhive. Zvezde koje se nalaze u toj arhivi nalaze se na glavnom nizu H-R dijagrama i imaju temperaturu od 3000 do 60000 K i metaličnost od  $-3.2$  do  $+1.4$  dex. Spektri zvezda su snimljeni u optičkom delu spektra u intervalu talasnih dužina od 3800 do 6800 Å. Njihovom obradom izračunata je ekvivalentna širina linije Fe I. Metaličnosti zvezda koje su korišćene za konstruisanje empirijskih grafika krive rasta su preuzete, takođe iz ELODIE arhive.

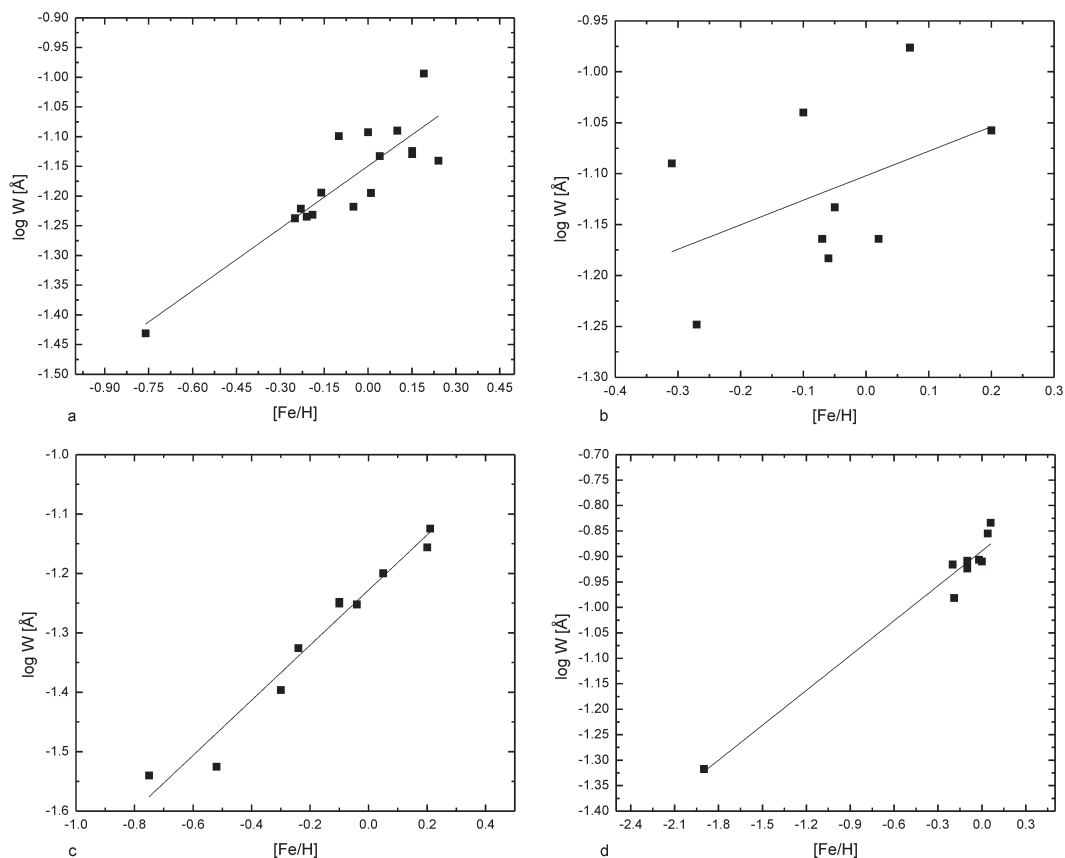
Metaličnost zvezda je izračunata pomoću empirijskih grafika krive rasta. Da bi se nacrtao empirijski grafik krive rasta, potrebno je izračunati ekvivalentnu širinu linije, a da bi se izračunala ekvivalentna širina linije potrebno je normalizovati datu liniju. Normalizovanjem i integraljenjem apsorpcione linije izračunata je njena ekvivalentna širina po formuli (1). Pomoću izračunate ekvivalentne širine i metaličnosti zvezda preuzetih iz literature dobijeni su empirijski grafici krive rasta.

Zvezde korišćene u analizi su podeljene u četiri grupe. Podela je izvršena na osnovu temperature zvezda i broja zvezda jedne potklase. U prvoj grupi se nalaze zvezde klase F7 i F8, u drugoj G0, G1, G2 i G4, u trećoj G5 i G8 i u četvrtoj grupi se nalaze zvezde klase K0 i K2. Na slici 3 prikazani su empirijski grafici krive rasta za svaku grupu zvezda. Fito-

vanje podataka je izvršeno pod pretpostavkom da je linija slaba i da je logaritam ekvivalentne širine direktno srazmeran metaličnosti.

Pomoću nacrtanih empirijskih grafika krive rasta izračunate su metaličnosti zvezda korišćenih za analizu. Prema jednačini (1) izračunate su ekvivalentne širine linija u spektru zvezda korišćenih za analizu. Na slici 4 prikazana su poređenja metaličnosti zvezda sa i bez planeta izračunatih pomoću empirijskih grafika krive rasta i metaličnosti istih zvezda iz literature.

Linija neutralnog gvožđa pomoću koje su izračunate metaličnosti zvezda i pomoću koje su napravljeni empirijski grafici krive rasta je linija na  $5379.57\text{\AA}$ . Linija je izabrana zbog toga što ne dolazi do preklapanja ni



Slika 3. Empirijski grafici krive rasta zvezda klasa F7 i F8 (a), klasa G0, G1, G2, G4 (b), klasa K0 i K2 (c) i klasa G5 i G8 (d). Na y-osi se nalazi logaritam ekvivalentne širine, a na x-osi metaličnost zvezda preuzeta iz literature.

Figure 3. Empirical curve of growth of stars classes F7 and F8 (a), classes G0, G1, G2, G4 (b), classes K0 and K2 (c) and classes G5 and G8 (d). On y-axis is logarithm of equivalent width, and on x-axis is metallicity of stars taken from the literature.

sa jednom drugom linijom, zbog toga što se javlja u svim spektrima zvezda koje su korišćene u radu i zbog toga što linija dopire do kontinuuma spektra (Vince O. i Vince I. 2003, Vince O. i Vince I. 2004).

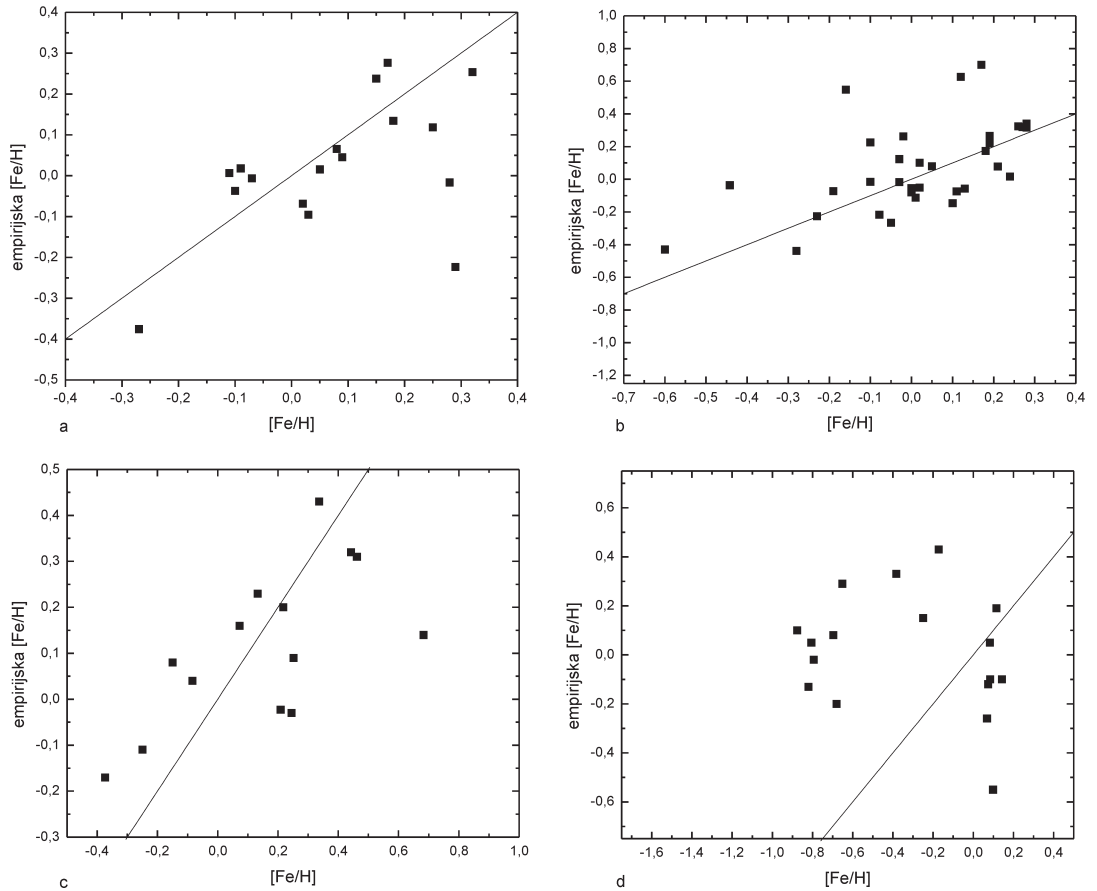
Korišćenjem Kolmogorov-Smirnovog testa (K-S test) upoređivane su distribucije metaličnosti zvezda sa planetama sa metaličnošću zvezda bez planeta (dvostruki K-S test). Rezultati K-S testa omogućavaju izračunavanje maksimalne udaljenosti dveju kumulativnih funkcija metaličnosti na osnovu maksimalne vrednosti standardne devijacije.

Radi brže obrade rezultata napisan je program u programskom jeziku Delphi. Program je izvršavao sve potrebne korake po opisanoj metodi. Kako bi se normalizovala linija, bilo je potrebno odrediti položaj kontinuuma. Pošto je apsorpciona linija uska, može se pretpostaviti da je kontinuum na tom delu iznad apsorpcione linije linearan. Linearna zavisnost dobijena je interpoliranjem dveju tačaka odabranih sa kontinuuma spektra oko te linije. Program je vršio linearnu interpolaciju sa korakom od  $0.05\text{\AA}$ . Razlika flukseva tačaka sa kontinuuma spektra, pomoću kojih je vršena linearna interpolacija, je odabrana da bude što manja.

## Rezultati i diskusija

Na slici 4 prikazana su poređenja metaličnosti zvezda sa planetama i zvezda bez planeta izračunatih pomoću empirijskih grafika krive rasta i metaličnosti istih zvezda iz literature. Linije na graficima predstavljaju linearne prave promene metaličnosti. Ukoliko je tačka sa grafika na liniji, metaličnost te zvezde izračunate na osnovu empirijskih grafika ne odstupa mnogo od prethodno izračunatih vrednosti. Najbolje poklapanje izračunatih metaličnosti sa onima dobijenih u ovom radu pokazale su zvezde spektralnih klasa G0, G1, G2 i G4, dok metaličnosti zvezda spektralnih klasa K0 i K2 ne naležu na datu pravu. Rezultat je bio neočekivan zbog toga što se na slici 3 može primetiti da je za klase K0 i K2 odrađen dobar fit (sa najmanjom greškom). Razlog zbog koga je došlo do ovako različitih vrednosti u metaličnosti je verovatno odabir kontinuuma spektara zvezda. Takođe, pretpostavljeno je da se grafik krive rasta ne menja mnogo između podklasa jedne spektralne klase, što je verovatno prouzrokovalo deo greške pri izračunavanju metaličnosti zvezda.

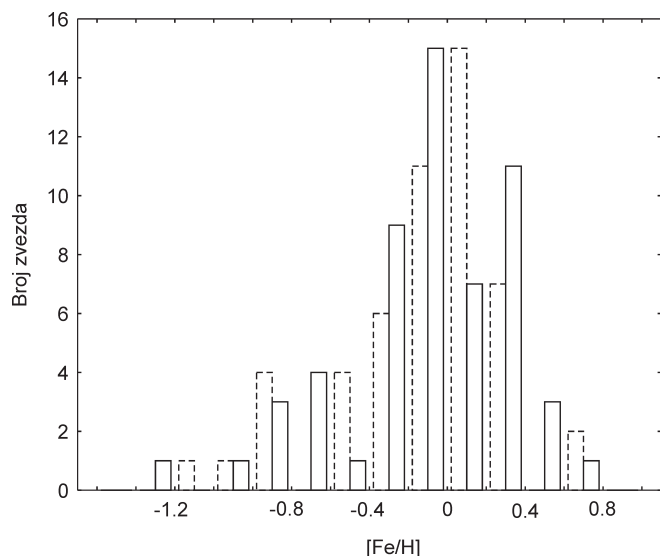
Na slici 5 prikazane su distribucije metaličnosti zvezda sa i bez planeta. Isprekidanom linijom je označena distribucija metaličnosti zvezde sa planetama, dok je punom linijom označena distribucija metaličnosti zvezda bez planeta. Može se primetiti da postoji veliki broj zvezda sa planetama koje imaju približno istu metaličnost kao i Sunce. Najveći broj zvezda sa planetama imaju metaličnost od -0.2 do 0.4 dex što je približno isto kao i rezultata koji su dobili Fisher i Valenti (2005) (od 0 do 0.4 dex).



Slika 4. Poređenje metaličnosti zvezda sa planetama i zvezda bez planeta sa metaličnostima istih zvezda iz literature zvezda klase F7 i F8 (a), klase G0, G1, G2 i G4 (b), klase G5 i G8 (c) i klase K0 i K2 (d). Na x-osi se nalazi metaličnost zvezda iz literature, dok se na y-osi nalazi metaličnost zvezda izračunatih pomoću empirijskih grafika krive rasta.

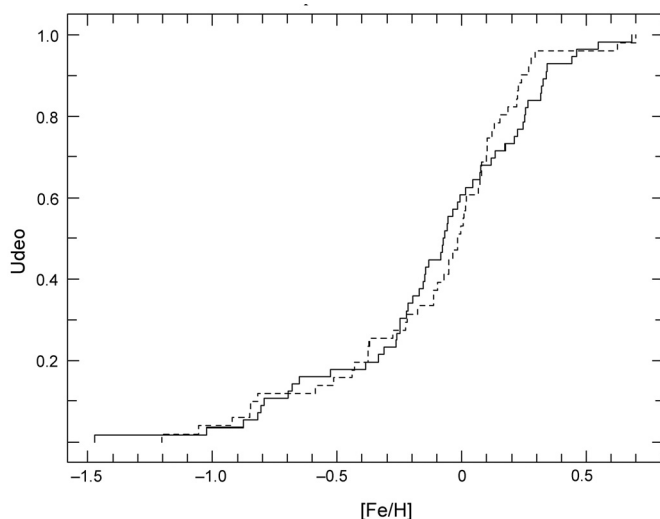
Figure 4. Comparison of metallicities of stars with and without planet with metallicities of the same stars from literature of classes F7 and F8 (a), classes G0, G1, G2, G4 (b), classes G5 and G8 (c) and classes K0 and K2 (d). On x-axis is metallicity of stars from literature and on y-axis is metallicity of the same stars calculated from the empirical curve of growth.

Rezultati K-S testa pokazali su da je verovatnoća da zvezde sa planetama i zvezde bez planeta dolaze iz iste populacije 0.62. Najveća razlika između ovih dveju kumulativnih funkcija je 0.14 dex. Takođe, rezultati su pokazali da obe distribucije odstupaju od normalne distribucije, jer kumulativna funkcija nije prava linija. Kumulativne funkcije metaličnosti zvezda sa planetama i zvezda bez planeta prikazane su na slici 6.



Slika 5. Distribucija metaličnosti zvezda sa planetama i zvezda bez planeta. Punom linijom prikazane su zvezde sa planetama, a isprekidanom linijom zvezde bez planeta

Figure 5. Distribution of metallicities of stars with and without planets. Full line represents distribution of metallicity of stars with planets, and dashed line represents distribution of metallicity of stars without planets



Slika 6. Kumulativne distribucione funkcije metaličnosti zvezda sa planetama (puna linija) i zvezda bez planeta (isprekidana linija).

Figure 6. Cumulative distribution functions of metallicities of stars with (full line) and without planets (dashed line).

## Zaključak

Empirijski grafici krive rasta su se pokazali kao zadovoljavajući, ali neprecizan metod za određivanje metaličnosti zvezda. Kod nekih klasa postoji veća greška, klase K0 i K2, dok je kod drugih zvezda klasa F7 i F8 i kod G0, G1, G2 i G4, ona manja. Greška je mogla da se javi zbog malog broja zvezda na osnovu kojih su nacrtani empirijski grafici krive rasta i pri izračunavanju ekvivalentne širine linije, odnosno pri odabiru kontinuuma spektra. Takođe na grešku je verovatno uticalo i to da je fitovanje podataka sa grafikona sa slike 3 odrađeno pod pretpostavkom da



je linija relativno slaba, da je formirana u slojevima fotosfere koji su blizu površine zvezde, i da je logaritam ekvivalentne širine direktno srazmeran metaličnosti zvezde (deo grafikona sa slike 2 označen brojem I).

Rezultati pokazuju da distribucija metaličnosti nema oblik normalne raspodele i da su distribucije metaličnosti zvezda sa planetama i zvezda bez planeta veoma slične. Očekivano je da se distribucije razlikuju, odnosno da je veći broj zvezda sa ekstrasolanrim planetama metaličniji, dok je distribucija metaličnosti zvezda bez planeta nepravilna (približno podjednak broj zvezda ima metaličnost veću i manju od 0 dex).

Fischer i Valenti (2005) su pokazali da zvezde sa planetama i zvezde bez planeta ne dolaze iz iste populacije. U ovom radu je utvrđeno da je verovatnoća da zvezde sa i bez planeta dolaze iz iste populacije 62%. Uzorak zvezda koji je korišćen za analizu nije bio odgovarajući, jer se u ELODIE arhivi nalaze zvezde koje su blizu Sunca i imaju metaličnost od -3 do +1.5 dex. Na rezultate je uticao i broj zvezda bez planeta. Ukoliko bi broj zvezda bez planeta bio veći, moguće je da bi se dobila distribucija koja je u skladu sa očekivanjima i ranijim rezultatima.-

Preporučuje se korišćenje ne samo jedne baze spektara već i drugih. Izračunate metaličnosti zvezda iz više različitih baza omogućiće tačnije izračunavanje metaličnosti zvezda sa planetama i zvezda bez planeta.

U daljem radu se može analizirati korelacija između  $[Na/Fe]$ ,  $[Si/Fe]$ ,  $[Ti/Fe]$ ,  $[Ni/Fe]$  od  $[Fe/H]$ . Time će se odrediti metaličnost zvezda na osnovu drugih elemenata i pokazati kako se metaličnost menja u toku evolucije zvezda. Takođe bi bilo interesantno ispitati kakva je distribucija zvezdanih populacija u galaksiji i time preciznije ispitati metod empirijskih grafika krive rasta i za neke druge linije gvožđa (5386.34, 5398.28, 5417.07, 6226.74 i 6232.64 Å) (Vince O. i Vince I. 2003, Vince O. i Vince I. 2004).

**Zahvalnost.** Autor se zahvaljuje Ivanu Miliću, mentoru rada i rukovodiocu programa astronomije u Istraživačkoj stanici Petnica, na sugestijama, posebno na pomoći pri definisanju metode rada. Igor Smolić i Milan Bogosavljević su svojim idejama i savetima značajno doprineli formulisanju teme rada. Autor se takođe zahvaljuje kolegenici sa programa astronomije, Vanji Šarković, na korisnim informacijama u toku izrade rada.

---

## Literatura

Fisher D. A., Valenti J. 2005. The planet-metallicity correlation. *Astrophysical Journal*, **622**: 1102.

Johnson J. A., Aller K. M., Howard A. W., Creep J. R. 2010. Giant planet occurrence in the stellar mass-metallicity plane. Draft version, May 2010.

- Lequeux J. 2003. *The Interstellar Medium*. Astronomy and Astrophysics library. Paris: Observatoire de Paris
- Prodanović T. 2010. *Uvod u spektroskopiju za astronome*. Novi Sad: Prirodno matematički fakultet
- Rocha-Pinto H. J., Maciel W. J. 1998. Consistency of the metallicity distribution of nearby F, G and K dwarfs. *Astronomy and Astrophysics*, 339: 791.
- Vince I., Vince O. 2003. Determination of metallicity of the HR 7914 Solar-like star. *Serbian Astronomical Journal*, 167: 69.
- Vince I., Vince O. 2004. Iron abundance determination of metallicity for the Solar-like stars HR 4345 and HR 6573. *Serbian Astronomical Journal*, 169: 41.

---

*Dušan Vukadinović*

## Metallicity of Stars with Extrasolar Planets

In this paper a method for determining stellar metallicity based on forming an empirical curve of growth has been presented. Empirical curves of growth present dependence of equivalent widths of line and metallicities of stars. Line of neutral iron at 5379.57 Å has been used for determination of star metallicity. Metallicity of stars of some spectral classes (classes K0 and K2) determined by empirical curve of growth and metallicity from reference is different. The main cause of this can be the small number of stars which are used for constructing the empirical curve of growth, or choosing continuum of star's spectrum. Another cause of error may be the approximation that the line is weak and that it is on the first part of the curve of growth, where the dependence of equivalent width and metallicity is linear.

The empirical curve of growth proved to be a good method for star metallicity determination. It has been concluded that there are many stars with metallicities with -0.2 to 0.4 dex which have planets. Using the K-S test it has been determined that a probability that stars with planets come from the same distribution as single stars is 0.62. Difference in metallicities of stars with and without planets is 0.14 dex.

